

令和6年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局電波部電波政策課、基幹・衛星移動通信課基幹通信室

評価年月：令和6年8月

1 政策（研究開発名称）

仮想空間における電波模擬システム技術の高度化

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

令和2年度～令和5年度（4か年）

・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人

・総事業費

7,306 百万円

令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	総 額
1,637 百万円	1,966 百万円	1,636 百万円	2,066 百万円	7,306 百万円

・概 要

Beyond 5G や自動走行、ドローン自律運転の普及・展開に向けて、多様な無線システムを大規模かつ高精度に模擬可能な電波模擬システムの実現に必要な以下の①～④に係る技術を確認するための研究開発等を行う。

なお、①②は技術課題ア「電波伝搬・空間モデルの構成技術」として、③は技術課題イ「仮想環境対応無線システムの構成技術」として、④は技術課題ウ「大規模仮想環境の検証基盤技術」として研究開発を実施した。

① 電波伝搬・干渉モデル化技術（技術課題ア「電波伝搬・空間モデルの構成技術」）

- ・歩行者・自動車等の移動体の動きも考慮して、仮想空間上で電波発射を高精度に模擬可能とする電波伝搬モデルの構築
- ・他の無線システムからの電波干渉による影響を実測・評価し、仮想空間上で干渉評価を可能とするモデルの構築

② 空間モデル化技術（技術課題ア「電波伝搬・空間モデルの構成技術」）

- ・都市／山間・屋内外・天候等において技術試験を行い、電波伝搬特性を取得し、各環境・天候モデルの構築
- ・建造物の形状・材質等について技術試験を行い、電波伝搬特性を取得し、建造物の形状・材質モデルの構築

③ 電波模擬技術（技術課題イ「仮想環境対応無線システムの構成技術」）

- ・無線システムの電波発射等の挙動を仮想空間上で模擬可能な仮想無線システムの開発
- ・仮想空間上の電波模擬のためのシナリオを受け取り、実装を行う電波模擬シナリオ実装技術の開発
- ・開発したシステムと実際の無線システムの電波発射再現性の評価・検証

④ 電波伝搬検証基盤技術（技術課題ウ「大規模仮想環境の検証基盤技術」）

- ・仮想空間上で高精度かつ大規模な電波伝搬・干渉影響評価を実現するために必要な検証基盤の開発
- ・検証基盤内の計算機リソースを適切に組み合わせて、高速・高精度に計算可能な並列・分散

計算技術の開発

- ・電波伝搬・干渉モデル及び空間モデルや電波模擬技術を活用し、仮想空間上で任意の配置（多数同時接続を含む）で無線システムが存在する環境を模擬し、シナリオの実行を行うためのインタフェース技術の開発

電波模擬システムの実現により、既存無線システムとの共用検討や実環境では困難な大規模な技術検証に活用することができ、新たな無線システムの早期実用化・展開に貢献するとともに、周波数利用効率の向上を図る。

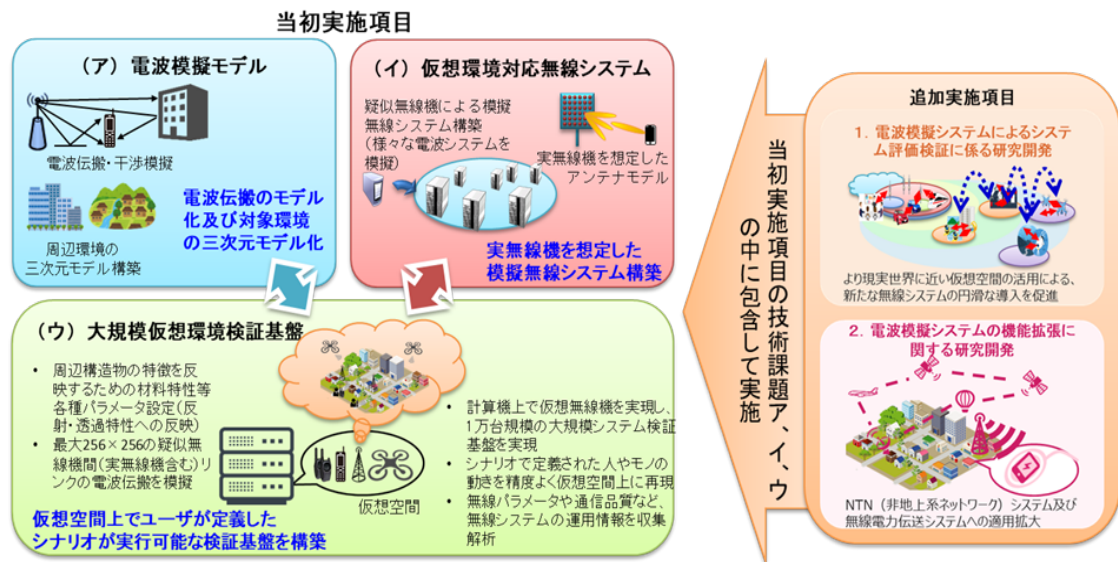
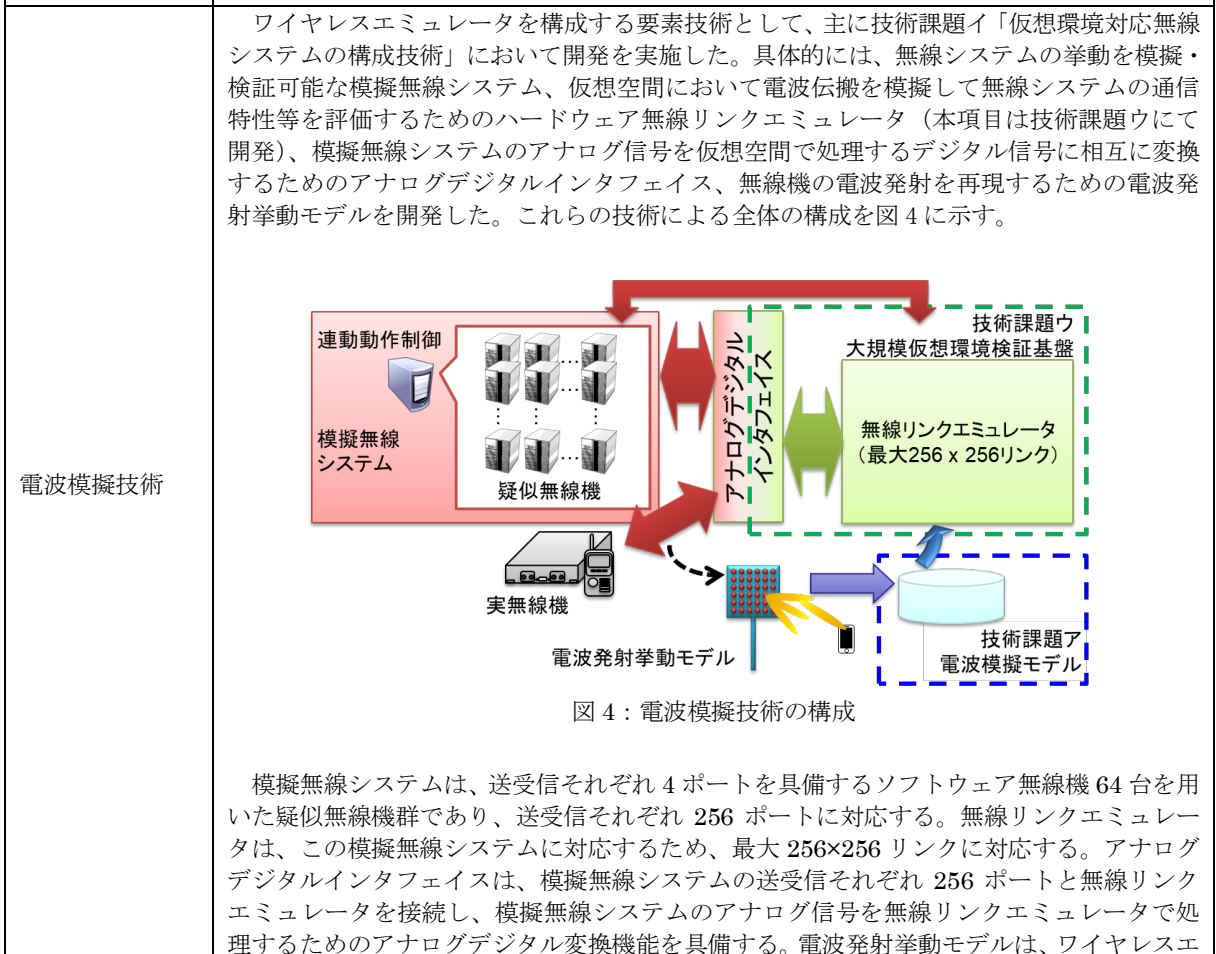
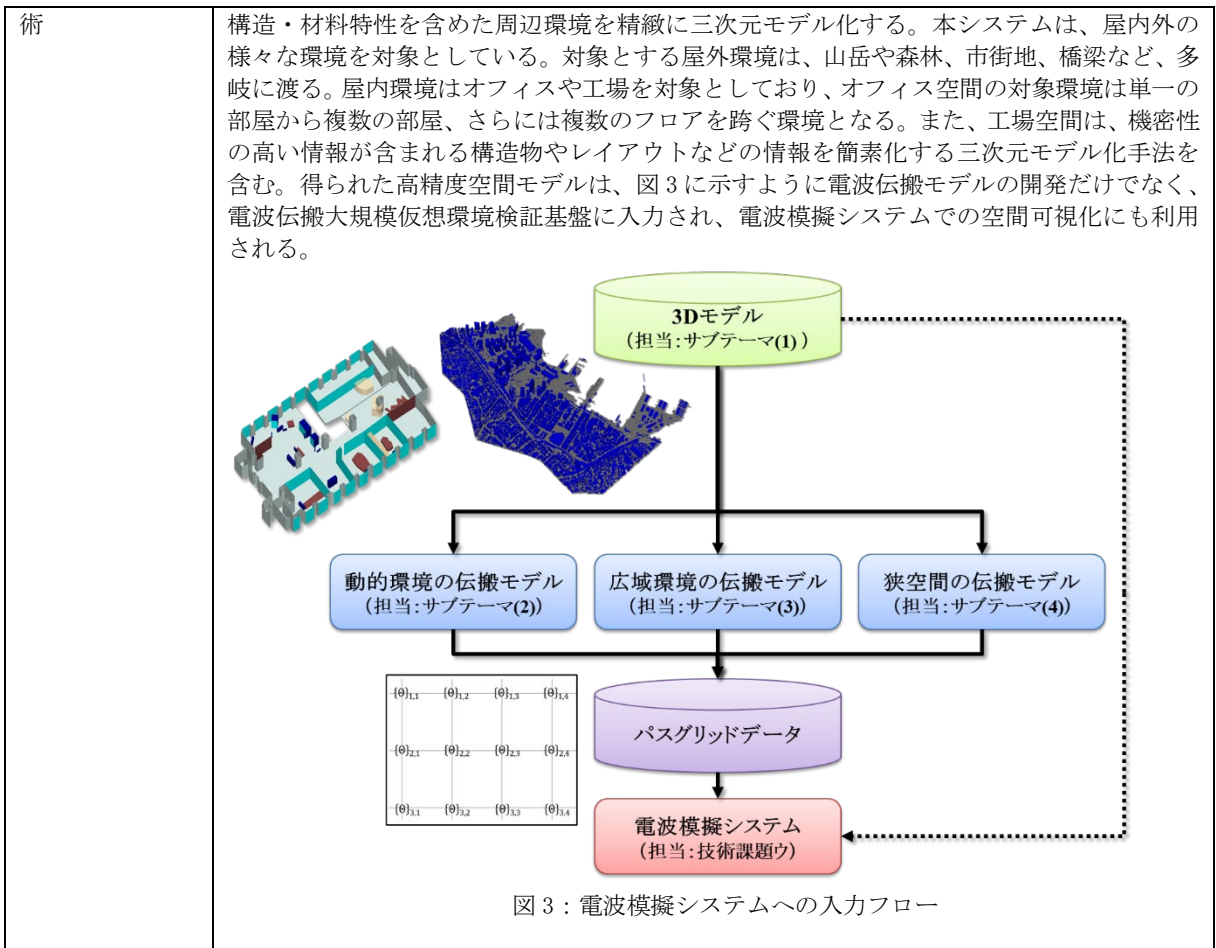
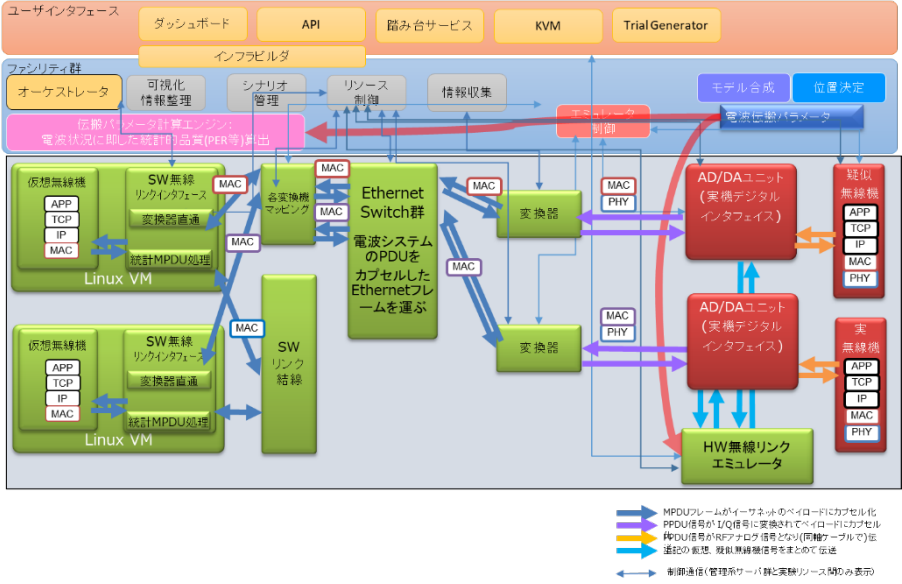


図1：研究開発概要図

技術の種類	技術の概要
電波伝搬・干渉モデル化技術	高度電波模擬システムにおけるシナリオ適用可能性に優れた電波伝搬モデルを構成するため、減衰・反射・回折などの電波伝搬特性や干渉特性を伝搬モデル解析やレイトレーシング解析等により高精度に模擬する。伝搬モデル解析では、従前から用いられているクラスタリング解析だけでなく、近年適用が期待されている深層学習を用いる手法も含む。得られた電波模擬モデルは、大規模仮想環境検証基盤に入力される。電波伝搬模擬手法としては、図2に示すように、無線機間、すなわちアンテナ間の相対的な距離に応じて狭域、中域、広域の3つの領域に分け、中域、広域の2つの領域について、最適な電波伝搬モデル化手法を適用する。
空間モデル化技術	高精度な電波模擬には周辺環境のモデル化が必須である。本技術では、環境変動特性及び

図2：電波模擬モデルの解析レイヤと構成



	ミュレータが対象とするアプリケーションに応じたアンテナの電波発射をモデル化したもので、具体的にはドローン搭載アンテナ、車載アンテナなどを対象とし、電磁界解析または実測によりモデル化を行う。このモデルは電波伝搬・干渉モデル化技術で開発した電波伝搬モデルに対してアンテナ特性を反映するためのモデルである。
電波伝搬検証基盤技術	本技術では、仮想空間上で高精度かつ大規模な電波伝搬・干渉影響評価を実現するために必要な検証基盤である大規模仮想環境検証基盤の開発を行う。また、当該検証基盤内の計算機リソースを適切に組み合わせて、高速・高精度に計算可能な並列・分散計算技術の開発を行う。さらに、電波伝搬・干渉モデル及び空間モデルや電波模擬技術を活用し、仮想空間上で任意の配置（多数同時接続を含む）で無線システムが存在する環境を模擬し、シナリオの実行を行うためのインタフェース技術の開発を行う。以下の図5に、大規模仮想環境検証基盤の構成概要を示す。  図5：大規模仮想環境検証基盤の構成 ワイヤレスエミュレータにおける基本的な動作と言える仮想空間上の無線機間の電波的相互作用は、図におけるハードウェア（HW）無線リンクエミュレータ、ソフトウェア（SW）無線リンクインタフェースにおいて実施される。こうした2種類の電波的相互作用実施機構は、評価対象である無線機の実装によって使い分けられている。疑似無線機間または疑似-仮想無線機の相互接続の場合では、HW 無線リンクエミュレータにより、物理層変調された信号に、減衰および遅延をそれぞれ加味しながら合成する処理がなされる。一方で、仮想無線機間の接続の場合には、各信号の上位層成分をカプセル化したパッケージが、SW 無線リンクインタフェースにより統計的に棄却されることで、想定する電波的相互作用が実現される。

・スケジュール

技術の種類	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
電波伝搬・干渉モデル化技術	モデル化基礎検討	モデル化拡張検討	モデル反映手法検討	統合実証
空間モデル化技術	モデル化基礎検討	モデル化拡張検討	モデル反映手法検討	
電波模擬技術	基礎開発 簡易シナリオ検討	拡張開発 基本実証シナリオ検討	結合評価 統合実証シナリオ検討	

電波伝搬検証 基盤技術	基礎開発	拡張開発	結合評価	

(2) 達成目標

新たな無線システムの導入に当たっては、既存無線システムに電波干渉が生じることがないように、実試験やシミュレーションにより共用検討を実施した上で技術基準を定める必要がある。しかしながら、実試験を行うためには、実機の試作や免許取得などの手続きに時間・費用を要することに加えて、実試験による検討では特定の環境における評価しか行えず、試験結果の信頼性に限界がある。今後、Beyond 5G や自動走行、ドローン自律運転等の利用が想定される中、実試験での検討に要する期間や費用の圧縮や、実環境では困難な大規模検証を実施するために、仮想空間上での電波模擬システム（電波エミュレータ）の構築が求められている。

そこで、仮想空間における高精度電波模擬システムの実現に向けて、無線システムの周波数帯・通信方式等を大規模かつ高精度で模擬可能な電波模擬システム技術確立のための研究開発及び総合的な技術試験を行い、周波数の有効利用を促進する。

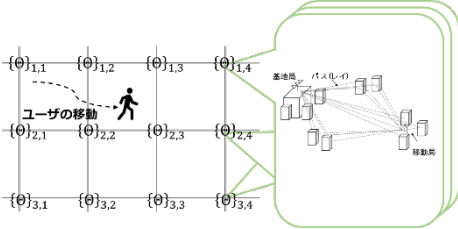
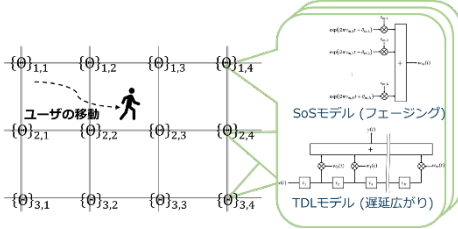
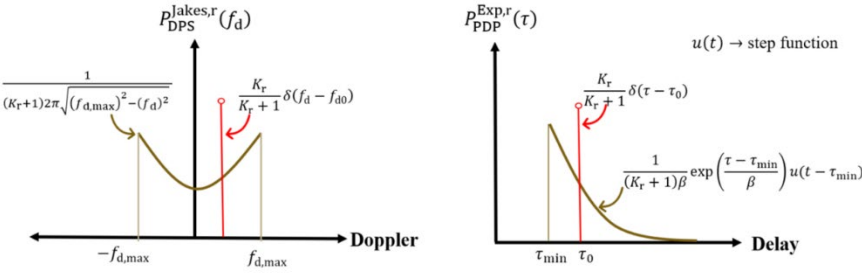
○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT 政策） 政策 13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
成長戦略フォローアップ（令和元年6月21日）	I. 1. ii) ② イ) ネットワークの更なる強化と高度化の推進 今後の電波利用ニーズの拡大への対応として、Beyond 5G の要素技術やその円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境、HAPS（High-Altitude Platform Station）を用いた通信システム等に関する研究開発を推進するとともに、既存システムとのダイナミックな周波数共用を可能とするシステムの構築を来年度末までに行う。
世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和元年6月14日）	第一部 V. 1（3） 5G 環境等の普及、光ファイバ網の整備 今後の電波利用ニーズの拡大への対応として 5G の普及・高度化に向け、5G 基地局の小型化や高エネルギー効率化、高信頼化やその円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境等に関する研究開発を推進するとともに、既存システムとのダイナミックな周波数共用を可能とするシステムの構築を令和2年度末までに行う。あわせて、5G のサービスを支える基地局や光ファイバなどの情報通信インフラの整備を進めるとともに、5G による地域課題解決に向けた開発実証を推進していく。
デジタル社会の実現に向けた重点計画（令和5年6月9日）	第3-2 5.（4）①高度情報通信環境の普及促進に向けた研究開発・実証 新たな電波システムの円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境に関する研究開発を推進し、令和5年度（2023年度）までに試験環境を構築する。

(3) 目標の達成状況

技術の種類	目標の達成状況																			
電波伝搬・干渉 モデル化技術	周波数の有効利用の一層の向上には、自動走行を含む ITS や、人やモノの動きも含めた動的環境における電波伝搬の解析等を可能とし、移動経路の変更をリアルタイムに適用できるような仕組みを実装する必要がある。そこで本技術開発では図 6 のように空間上のグリッド点において振幅・遅延時間・伝搬角度などの情報を有する複数の伝搬パスにより電波伝搬特性をモデル化し（これをパスグリッドモデルと呼んでいる）、このモデルに送受信機のアンテナ指向性を重畳し、さらにワイヤレスエミュレータのオーケストレータから指示される端末等の移動によって生じるドップラ変動を加えた SoS(sum of sinusoid)-TDL (tapped delay line)グリッドモデルを開発した（図 7）。TDL モデルは各パスの連続的な伝搬遅延時間をクラスタ化し、有限個数の遅延タップで表現したもので、広帯域信号の周波数選択性を表現する。SoS モデルは、遅延時間によりクラスタ化された複数のパスが伝搬方向と移動方向のなす角度に依存したドブラ周波数で位相回転することで、動的チャネルの時間選択性を表現する。さらに、時間に伴って移動する端末位置に対応してグリッド内の任意の点におけるチャネル応答をグリッド点から補間により求めることで SoS-TDL 時刻データが出力される。SoS-TDL 時刻データは、疑似無線機に対応しリアルタイムでチャネル応答を模擬する無線リンクエミュレータに入力されるほか、仮想無線機向けに変動分布、時間相関特性、周波数相関特性が等価となる標準チャネルモデル（図 8）に変換され、無線リンクインタフェースの動作を決定する MAC 層の packets 誤り率(PER)/ブロック誤り率(BLER)へマッピングされる。 開発した各環境のパスグリッドデータは、実測データにより比較検証により、伝搬損失は統計的に 80%の精度を実現した。また工場環境のシナリオについては、任意の送信局と受信局の組み合わせのパスグリッドデータを完成し、基地局と端末間だけでなく、端末間同士の干渉についても評価可能なモデルの構築を実現した。実験データにより検証された（伝搬損失による決定係数 80%以上の精度を実現）パスグリッドデータ一覧を表 1 に示す。																			
	 図 6：パスグリッドモデル	 図 7：SoS-TDL モデル																		
	 図 8：仮想無線機用標準チャネルモデル																			
		表 1：仮想無線機用標準チャネルモデル <table><tr><th>アプリケーション</th><th>サイト</th><th>周波数 (モデル)</th></tr><tr><td>ドローン</td><td>橋梁</td><td>169 MHz (R), 920 MHz (R), 2.4 GHz(R), 5.7 GHz(R)</td></tr><tr><td></td><td>山岳</td><td>169 MHz (R), 2.4 GHz(R)</td></tr><tr><td>スマートオフィス</td><td>オフィスフロア</td><td>2.4 GHz(R), 4.85 GHz(R), 5.2 GHz(R), 28 GHz(R), ITU-R P.1238 (S)</td></tr><tr><td>スマート工場</td><td>屋内 (大、中)</td><td>2.4 GHz(R), 5.3 GHz(R), 920 MHz (R), 4.85 GHz(R), 28 GHz(R), 60 GHz(R)</td></tr><tr><td>スマートメータ /B5G/ITS</td><td>みなとみらい</td><td>920 MHz(R/P/H), 2.4 GHz(P), 4.9 GHz(R/P/H), 28 GHz(R/P/H), 3GPP SCM(C), ITU-R P.1411 over roof top(S), ITU-R P.1411 street canyon(S)</td></tr></table> R:レイトレーシングレイヤ, P:伝搬モデルレイヤ, H:RPハイブリッド, S:簡易モデル(パスグリッドなし), C:計算コード提供	アプリケーション	サイト	周波数 (モデル)	ドローン	橋梁	169 MHz (R), 920 MHz (R), 2.4 GHz(R), 5.7 GHz(R)		山岳	169 MHz (R), 2.4 GHz(R)	スマートオフィス	オフィスフロア	2.4 GHz(R), 4.85 GHz(R), 5.2 GHz(R), 28 GHz(R), ITU-R P.1238 (S)	スマート工場	屋内 (大、中)	2.4 GHz(R), 5.3 GHz(R), 920 MHz (R), 4.85 GHz(R), 28 GHz(R), 60 GHz(R)	スマートメータ /B5G/ITS	みなとみらい	920 MHz(R/P/H), 2.4 GHz(P), 4.9 GHz(R/P/H), 28 GHz(R/P/H), 3GPP SCM(C), ITU-R P.1411 over roof top(S), ITU-R P.1411 street canyon(S)
	アプリケーション	サイト	周波数 (モデル)																	
ドローン	橋梁	169 MHz (R), 920 MHz (R), 2.4 GHz(R), 5.7 GHz(R)																		
	山岳	169 MHz (R), 2.4 GHz(R)																		
スマートオフィス	オフィスフロア	2.4 GHz(R), 4.85 GHz(R), 5.2 GHz(R), 28 GHz(R), ITU-R P.1238 (S)																		
スマート工場	屋内 (大、中)	2.4 GHz(R), 5.3 GHz(R), 920 MHz (R), 4.85 GHz(R), 28 GHz(R), 60 GHz(R)																		
スマートメータ /B5G/ITS	みなとみらい	920 MHz(R/P/H), 2.4 GHz(P), 4.9 GHz(R/P/H), 28 GHz(R/P/H), 3GPP SCM(C), ITU-R P.1411 over roof top(S), ITU-R P.1411 street canyon(S)																		

空間モデル化 技術	電波模擬システムでは、通信システムの評価を行う予定の通信環境を電波模擬システム内に取り込み、想定環境における通信システムの性能を評価できる機能が必要である。本技術では、構造物の形状・材質モデルの構築のため、レーザースキャナ等により計測された周辺環境をシミュレーションモデルとして構成する技術や電波模擬システム内に周辺環境モデルを取り込む技術について検討を行い、電波模擬システム上で、レイトレーシングシミュレーション等に適用可能な、誤差 1m 以下の精緻な屋内・屋外の周辺環境の 3D モデルを構成する技術を確立した。 令和 3 年度までの研究では、屋内・屋外のそれぞれの環境において、高精度な点群データを用いてレイトレーシングシミュレーションで利用可能な構造物の面情報を持つ 3D モデル（以下、詳細 3D モデル）を構成する手法を検討した。実寸や元の点群データと 3D モデルの寸法を比較し、構成した詳細 3D モデルが誤差 1m 以下であることを確認した。さらに令和 4 年度の研究では、詳細 3D モデルを電波模擬システムで想定される大規模なレイトレーシングシミュレーションに適用するために、3D モデルの単純化手法を検討した。単純化された 3D モデル（以下、単純 3D モデル）を用いたレイトレーシングシミュレーションを実施し、計算時間や計算精度の検証からレイトレーシングシミュレーションに適用可能であることを確認した。令和 5 年度の研究では、令和 4 年度までに検討した屋内・屋外の 3D モデルの構成技術について、さらにアルゴリズムの改良やパラメータチューニングを実施し、レイトレーシングシミュレーションに最適な 3D モデルを構成した。また、伝搬モデル検討を行う各サブテーマへ本 3D モデルを提供し、構成した 3D モデルを技術課題ウの電波模擬システム上で再現する技術を確立した。 本研究に用いた屋外環境の点群データには、屋外構造物の全容がデータ取得可能な航空機レーザで計測した点群データ（以下、航空データ）や、地表付近の構造物のデータ取得に優れた Mobile Mapping System (MMS) による車載レーザで計測した点群データ（以下、MMS データ）等がある。本研究では、これらを組み合わせて相互に補完した図 9 に示す点群モデルを用いた。 また各環境・天候モデルの構築のため、都市／山間・屋内外・天候等において電波伝搬特性を取得し（図 10）、山間部のドローン自律運転の無線システム向けには、図 11 に示すように季節による植生の変化を空間モデルに反映した、また自動走行の無線システムでは、天候によりミリ波レーダなどで車両からの電波の反射強度が変わることを想定した測定も実施した（図 12）。 図 9：航空データと MMS データが結合された屋外点群モデル（各点の高さで色分け）
--------------	---

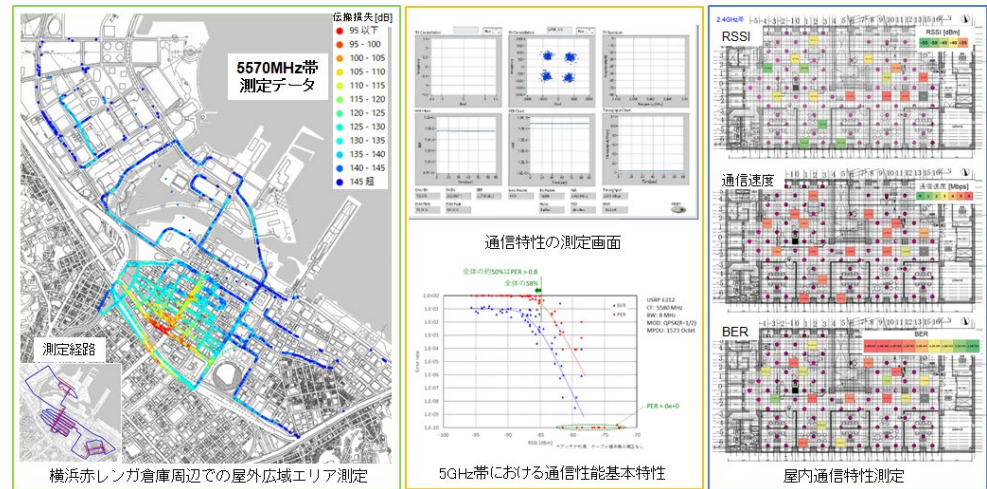
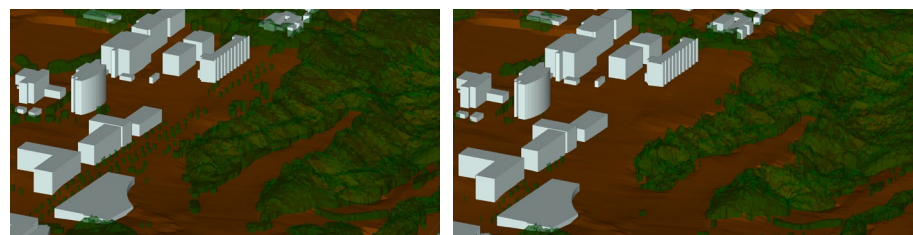


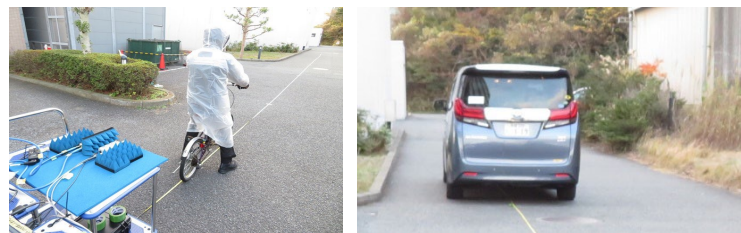
図 10：屋内外環境における電波伝搬特性の取得



(a) 夏季

(b) 冬季

図 11：山岳環境空間データ



(a) 自転車

(b) 車両

図 12：降雨の影響を考慮した電波反射測定（対象物に散水した状況で測定）

電波模擬技術

4 年間の研究開発を通じて、仮想環境において無線システムの評価を行うための各要素技術（模擬無線システム、ハードウェア無線リンクエミュレータ、アナログデジタルインタフェース、電波発射挙動モデル）の開発について、当初の目標通り達成することができた。模擬無線システムは、送受信それぞれ 4 ポートに対応したソフトウェア無線機を用いて 5G NR や IEEE 802.11ax 等の電波システムが動作する疑似無線機を開発した（図 13）。64 台の疑似無線機を用いて送受信それぞれ 256 ポートの動作が検証できる模擬無線システムを開発した。ハードウェア無線リンクエミュレータと模擬無線システムを接続するためのアナログデジタルインタフェースを開発した。256×256 の無線リンクに対して独立に電波伝搬モデルを与えることができ、ユーザが定義するシナリオに基づき電波伝搬特性が動的に変化する統合システムを開発した。周波数帯域幅は 100 MHz を標準としつつ、複数のリンクを束ねることによって最大 400 MHz に対応可能とし、100 MHz 帯域幅の 5G NR などの複数の信号が混在した環境を模擬して相互干渉による特性劣化などの評価が可能であることを実証した。また、商用のフェージングエミュレータと比較による検証を実施し、比較可能な特性については同等の性能が得られることを確認した。実無線機としては、上述の疑似無線機のほか、Wi-Fi や Bluetooth などの実無線機を用いて評価できることも確認した。これらの成果により、実無線機に関しては送受信それぞれ最大 256 ポートの制限の中で、SISO(Single Input Single Output)であれば最大 256 台、4×4 MIMO (Multi Input Multi Output) であれば最大 64 台の大規模な同時検証を実現できる評価環境の構築を実現した。また異なる無線システム間の

干渉評価等のみでなく、新しい無線アクセス技術であるフルデュプレクス（全二重通信、FD）を実現するための端末スケジューラ機能を包含したエミュレーションオーケストレータを開発し、Beyond 5G(B5G)を志向したFD動作を追加した場合のエミュレーションを実現した。これらの成果により、周波数の有効利用の一層の向上を目指した新規技術の検証が可能であることを確認した。

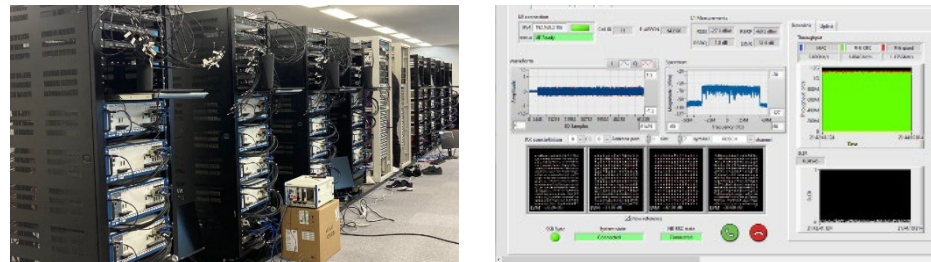


図 13：開発した模擬無線システム
(左：横須賀に設置した模擬無線システム、右：5G NRの評価画面)

ワイヤレスエミュレータを活用するユースケース／アプリケーションとして、B5G セルラシステム、ドローン／ロボット、ITS、スマートオフィス、スマート工場、次世代スマートメータを対象とした実利用に関する開発を実施した。また、電波伝搬特性に静止衛星や低軌道衛星に対応した長遅延、高速ドップラを適用するための拡張を行い、疑似衛星局を接続して NTN 通信の電波伝搬模擬が可能であることを実証した。

無線機の電波発射を高精度に模擬するため、ドローンや車載アンテナなど、実利用を想定したアンテナの電波発射挙動モデルの開発を実施した。無指向性アンテナの評価では、Sub6GHz 帯の多くの周波数帯において、半値角+30 %の角度範囲で決定係数 0.8 を達成した（図 14）。つまり、仮想環境における伝搬損失の計算データは、実測データの 80%の精度であった。また、指向性アンテナの放射パターンを反映させ、受信電力のヒートマップが出力できることを工場環境にて確認した（図 15）。これらの成果により、仮想環境において、実環境に近い条件で自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現した。

角度範囲	169 MHz	760 MHz	922 MHz	2462 MHz	4050 MHz	4850 MHz	5410 MHz	5810 MHz
HPBW	0.8	0.7	1	0.5	0.9	0.8	0.1	0.6
HPBW+30%	0.9	0.8	1	0.8	0.8	0.9	0.5	0.8
全体	1	0.9	1	0.9	0.9	0.9	0.9	1

図 14：決定係数としての無指向性アンテナの放射パターン精度検証結果

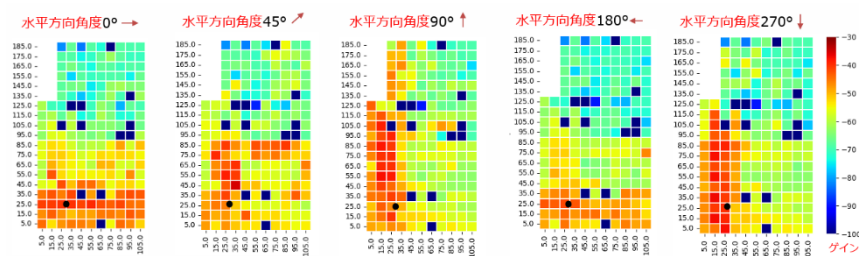


図 15：工場環境にて指向性アンテナの放射パターンを反映させた受信電力のヒートマップ

電波伝搬検証 基盤技術

電波伝搬検証基盤技術では、「技術課題ウ 大規模仮想環境の検証基盤技術」の観点より、4年間の研究開発を通じて、無線機間の通信状態を模擬するために、ユーザの実験シナリオに基づき、電波伝搬モデルを最適に構築する大規模仮想環境検証基盤の構築のための研究開発について、当初の目標どおり達成することができた。具体的には、「ハードウェア無線リンクエミュレータ技術の研究開発」では、ハードウェア無線リンクエミュレーションと呼ぶ、高精細な伝搬モデルを基にした無線リンクの伝搬模擬と、疑似無線機、仮想無線機、実無線機との間の通信具現化を実現し、「仮想無線機エミュレータ技術の研究開発」では、最大 10,000 ノードの仮想無線機の模擬と、実環境同様のアプリケーションとプ

ロトコルスタックを利用した実験を実現し、「実験実行オーケストレータ技術の研究開発」では、ユーザが定義するシナリオを元に模擬を実行し、上記の課題に対し適切な動作の提供を実現し、「実験観測機構の研究開発」では、模擬の状況や結果をわかりやすく管理者や利用者が得るための観測システムを実現した。これにより、当該検証基盤上に、10,000 台規模の仮想無線機を計算機環境の整備により構築し、疑似無線機と相互に接続ができ、個別の移動パターンやアプリケーション等を同時に変化可能な検証環境を仮想空間上に構築し、想定されるエミュレーションシナリオに応じて適切に連携させながら動作可能とした。

「ハードウェア無線リンクエミュレータ技術の研究開発」について、疑似無線機、仮想無線機、実無線機との間の通信の具現化を行い、IEEE 802.11g/ax、Wi-SUN FAN の相互接続実証を実施した〔アウトカム：大規模な同時検証を実現〕。以下の図 16 に、IEEE 802.11ax の相互接続実証について示す。

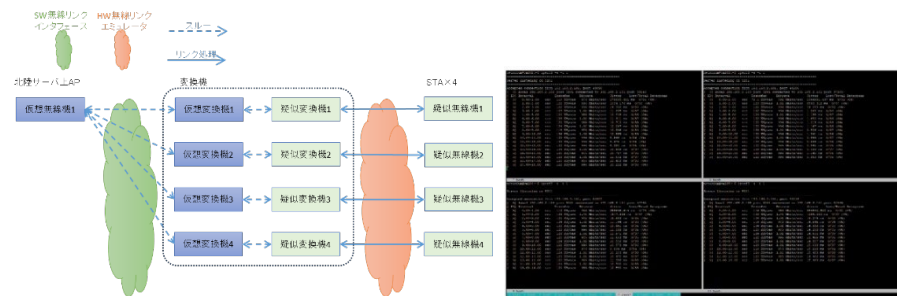


図 16：IEEE 802.11ax の相互接続実証：（左）トポロジ構成、（右）アプリ動作画面

「仮想無線機エミュレータ技術の研究開発」について、Wi-SUN FAN 仮想無線機 10000 台の動作実証を成功裏に行った〔アウトカム：周波数の有効利用の一層の向上、大規模な同時検証を実現〕。また、課題イの各エミュレーションシナリオに即した、5G-NR、802.11g/ax、Wi-SUN FAN の仮想無線機が動作できる環境を整備した。以下の図 17 に、IEEE 802.11ax 仮想無線機を用いた EDCA 機能の動作検証を示す。

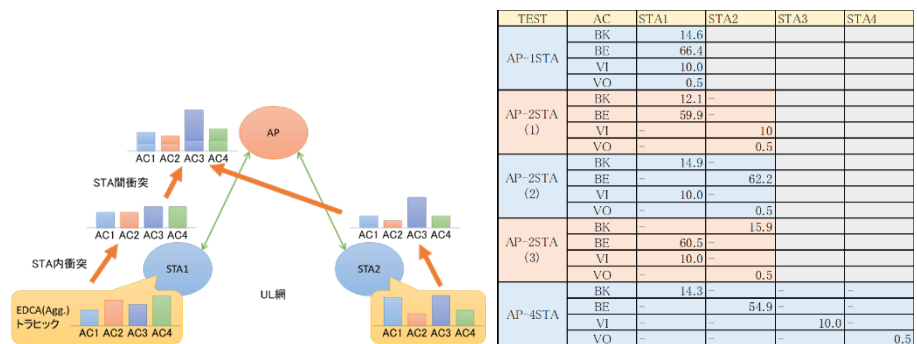


図 17：IEEE 802.11ax 仮想無線機を用いた EDCA 機能動作検証：（左）動作概要、（右）検証結果

「実験実行オーケストレータ技術の研究開発」について、課題イの各エミュレーションシナリオと、山岳地帯ドローンシステムのシナリオを実証した〔アウトカム：自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現〕。以下の図 18 に、山岳ドローンシステムのシナリオ実行画面を示す。

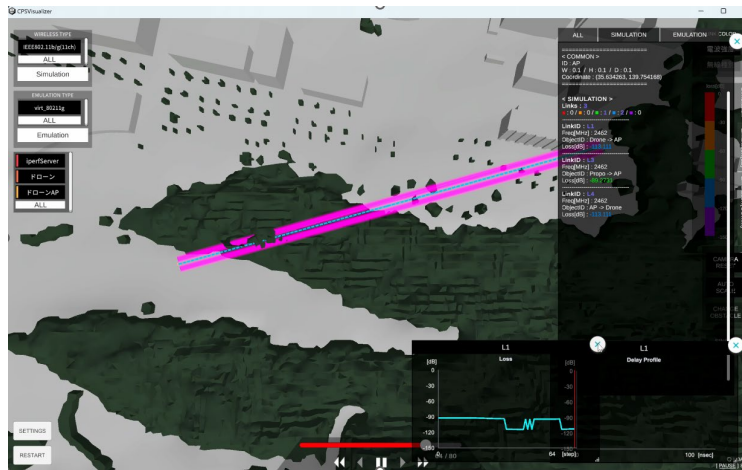


図 18：山岳ドローンシステムのシナリオ実行画面

「実験観測機構の研究開発」について、利用者側のインタフェースの実装によりビジュアライザを構築し、進行エミュレーションの観測系も実装した。以下の図 19 に、開発されたビジュアライザ上でユーザインタフェースとして提供されるメニュー画面を示す。

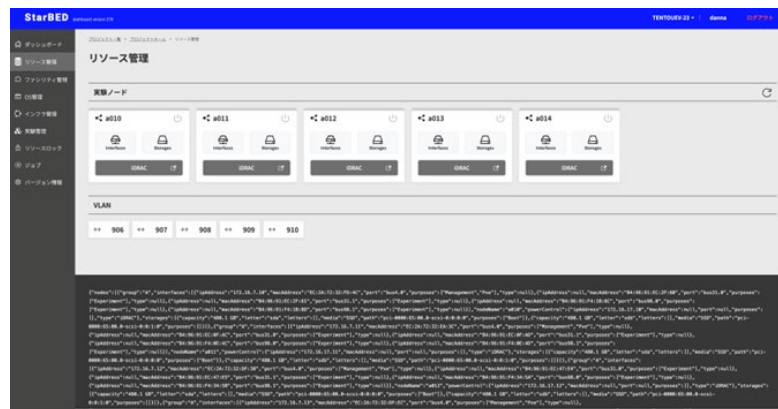


図 19：ビジュアライザのメニュー画面

〔アウトカム：大規模な同時検証を実現〕の4年間の目標達成状況について、図 20 に示す。

主な指標	目標値	目標年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
大規模な同時検証を実現	10,000台	令和5年度	—(複数台動作に関する基本検討を実施)	2,000台	5,000台	10,000台

図 20：[大規模な同時検証を実現]の目標達成状況の推移

3 政策効果の把握の手法

- 研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和6年6月21日）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。また、当該会議に臨んで、本研究開発の成果として得られた電波伝搬検証基盤技術に関する外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査すると同時に、必要性・有効性等の分析を実施した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

- ・研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、仮想環境における実無線機の高精度模擬のための実装技術開発の成果をまとめた論文が、通信産業分野のパラダイムシフトを促す成果として評価され国際会議でベストペーパーアワードを受賞するなど、国外においても高い評価が得られた。また、工場環境での電波伝搬推定及び可視化技術をベースに市販の工場レイアウトシミュレーションソフト上に通信状態を可視化する機能に関する特許を国内機関と共同で出願し、電波可視化機能プラグインとして実製品化を目指した開発を進めるなど、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。
- ・当該研究開発による特許の実績として、同一周波数帯で、周波数資源を共有する無線機同士の干渉回避・共存動作の大規模仮想環境検証基盤における実装を想定した無線アクセス制御方式のモデル化に関連する発明が特許出願されており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。
- ・当該研究開発による論文の実績として、仮想空間における多数の無線機間の自律分散型周波数資源共用、および外部システムからの無線干渉回避のモデル化に関する検証手法に関する論文が、査読付き国際会議で採録されるとともに、うち2件の論文について、当該国際会議が定めるベストペーパーアワードが授与されており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。
- ・当該研究開発による研究発表の実績として、大規模仮想環境検証基盤も関連するテストベッド環境の国際接続実証を兼ねた展示会等において複数回の出展ならびに成果発表を実施していて、うち1件の出展については、展示会が定めた受賞を受けており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

(2024/7/29 現在)

主な指標	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	合計
査読付き誌上 発表論文数	0件 (0件)	3件 (3件)	4件 (2件)	13件 (9件)	20件 (14件)
査読付き口頭 発表論文数 (印刷物を含 む)	8件 (8件)	15件 (15件)	28件 (27件)	20件 (19件)	71件 (69件)
その他の誌上 発表数	0件 (0件)	3件 (0件)	2件 (0件)	3件 (0件)	8件 (0件)
口頭発表数	35件 (1件)	68件 (8件)	87件 (18件)	124件 (7件)	314件 (34件)
特許出願数	8件 (0件)	10件 (0件)	7件 (0件)	9件 (0件)	34件 (0件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	3件 (0件)	3件 (0件)
国際標準提案 数	0件 (0件)	1件 (1件)	2件 (2件)	0件 (0件)	3件 (3件)
国際標準獲得 数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
受賞数	2件 (2件)	1件 (0件)	3件 (2件)	8件 (1件)	14件 (5件)
報道発表数	1件 (0件)	1件 (0件)	0件 (0件)	4件 (0件)	6件 (0件)
報道掲載数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読(peer-review(論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの))のある出版物に掲載された論文等(Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む)を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集(電子媒体含む)に掲載された論文等(ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。)を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等(電子情報通信学会技術研究報告など)は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等(査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む)を計上する。

注5：PCT(特許協力条約)国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。(何カ国への出願でも1件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	「超高速」、「多数接続」、「低遅延」といった特徴を持つ無線通信を可能とする第5世代移動通信システム（5G）は、2020年代に普及していくことが想定されるが、無線通信は概ね10年で世代交代が行われていることを踏まえ、2030年代の新たな無線通信である「Beyond 5G」に関する検討が進められている。新たな無線システムの導入に当たっては、既存無線システムに電波干渉が生じることがないように、実試験やシミュレーションにより共用検討を実施した上で技術基準を定めることになるが、実試験を行うためには、実機の試作や免許取得などの手続きに膨大な時間・費用を要する。また、既存無線局についても、我が国の無線局数はここ数十年、一貫して増加傾向にある。膨大な数の無線局が実環境において問題なく動作するか確認するため、実証において、現在は実機による実試験が行われているが、特定の環境において限定的な数での評価しか行えず、試験結果の信頼性に限界がある。 実試験での検討に要する期間や費用の圧縮や、実環境では困難な大規模検証を実施するために、仮想空間上での電波模擬システムの構築が求められてきた。本研究開発で開発したワイヤレスエミュレータは、送受信それぞれ256ポートの実無線機、最大10000台の仮想無線機による大規模実証を可能とし、ITS、ドローン、スマートオフィス、スマート工場、スマートメータのアプリケーションのそれぞれに求められる検証機能（中継経路選定、置局設計、大規模検証など）により評価環境としての有効性を評価することができる。また、電波伝搬検証基盤技術を活用したワイヤレスエミュレーション技術を適用することにより、上記課題の解決に資するだけでなく、災害時、事故時等の環境変化を高精度にシミュレートし、システムやサービスの挙動を可視化し、評価・検証することも可能になる。これにより、新たな無線システムの研究開発プロセスの加速化・コスト削減及び、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの導入・普及の加速化を図り、我が国の新産業の創出及び国際競争力強化に対して、本研究開発の寄与は極めて大きい。 よって、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	電波模擬技術の推進に当たっては、本研究開発の成果であるワイヤレスエミュレータを用いることで、実環境を模擬した仮想環境において多くの実無線機を用いることなく、様々なアプリケーションでの無線通信のシステム評価、置局設計等の検証などが実現でき、これまでの実フィールドによる実証に対する質の高い代替手段として活用できる見込みを得た。また、電波伝搬検証基盤技術の推進に当たっては、電波伝搬に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する民間企業、大学、国立研究開発法人、独立行政法人等のノウハウや既存のデータを積極的に活用することにより、効率的に研究開発等を推進することができるため、投資に対して最大の効果が見込まれるよう進めてきた。 実施期間中は、受託各社の研究代表者・実務者の定期的会合において各社の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成される運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。また対象とする5つのアプリケーション（ITS、ドローン、スマートオフィス、スマート工場、スマートメータ）に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業、研究者等が参画し、それぞれのノウハウを積極的に活用して効率的に研究開発が進められた。また、早期に研究開発成果の社会展開を図るため、産学官からなるユーザフォーラム等の関係機関と密接に連携し、実用化を見据えた検討を進めてきた。 委託経費の執行に当たっては、事前に予算計画書を確認するとともに、年度途中及び年度末に経費の執行に関する経理書類を提出させ、総務省担当職員が詳細な経理検査を行い、予算の効率的な執行に努めた。加えて、専門的知見を有した監査法人に経理検査の補助を依頼し、経費執行の適正性・効率性を確保してきた。予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	電波模擬技術では、仮想環境において無線システムの評価を行うための要素技術を開発し、256×256の無線リンクに対して独立に電波伝搬モデルを与え、ユーザが定義するシナリオに基づき電波伝搬特性が動的に変化する統合システムとして、SISOであれば最大256台、4×4 MIMOであれば最大64台の大規模な同時検証を実現できる評価環境の構築を実現した。また、新しい無線アクセス技術であるFDを実現するための機能を開発し、B5Gを志向した新規技術のエミュレーションを実現し、周波数の有効利用の一層の向上を目指した新規技術の検証が可能であることを確認した。無線機の電波発射を高精度に模擬するため、ドローンや車載アンテナなど、実利用を想定したアンテナの電波発射挙動モデル

	を開発し、多くの周波数帯において半値角+30 %の角度範囲で決定係数 0.8 を達成した。これらの成果により、仮想環境において、実環境に近い条件で自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現した。 電波伝搬検証基盤技術では、無線システムの周波数帯・通信方式等を大規模かつ高精度で模擬可能な大規模仮想環境検証基盤を構築し、当該基盤を用いた仮想空間上で電波を発射することなく評価対象システム・サービスの検証を実施することにより、新たな無線システムの研究開発プロセスの加速化・コスト削減及び、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの導入・普及の加速化を通じた我が国の新産業の創出及び国際競争力強化が見込まれる。具体的な成果として、Wi-SUN FAN 仮想無線機 10000 台の動作実証を成功裏に行った成果をはじめ、5G/B5G、ドローン、ITS、スマートオフィス、スマートメータなどの各エミュレーションシナリオに即した、5G-NR、802.11g/ax、Wi-SUN FAN の仮想無線機が動作できる環境を整備し、周波数の有効利用の一層の向上、大規模な同時検証、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現〔いずれもアウトカム〕のいずれに対しても寄与することができた。また、スマートオフィスのための無線システムのプロバイダをはじめとするワイヤレスエミュレータの利用者を構成員に含むユーザフォーラム「ワイヤレスエミュレータ利活用社会推進フォーラム」を立上げ、当該フォーラムにおいて、ワイヤレスエミュレータの利活用に有効な所要技術等について議論を継続していることから、研究開発成果の利用者や情報通信業界に限らない多様な専門家や利用者との連携・協力を得つつ、研究開発と実証実験を一体的に推進しており、研究成果の実用化等へ向けた高い確実性が得られた。また、ユーザフォーラムを通じて、研究開発成果の周知だけでなく、当該研究開発終了後のワイヤレスエミュレータの利活用の持続的な発展に繋がる活動を推進してきた。このような活動は、当該研究開発の受託機関等にとどまらず、今後新たにワイヤレスエミュレータの利活用に関する業務を開始した機関の新規参入をも想定するものであることから、当該研究開発の関連分野の将来の発展にも貢献することが期待される。 よって、本研究開発には有効性があると認められる。
公平性	本研究開発は、5 つの具体的なアプリケーション（ITS、ドローン、スマートオフィス、スマート工場、スマートメータ）を想定した開発を実施し、それぞれに関して利用者の目線で必要な機能の実装を行った。また、電波伝搬検証基盤技術では、幅広い周波数帯について、無線システムの周波数帯・通信方式等を大規模かつ高精度で模擬可能な大規模仮想環境検証基盤を実現するものであるから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の受益となる。これらの機能を含む具体的な成果については、研究開発の各年度末に開催したワイヤレスエミュレータシンポジウムにて一般にも広く周知するとともに、ワイヤレスエミュレータの仕様策定・拡張に向けた公平な議論の場を提供するユーザフォーラムを設立した。 支出先の選定に当たっては、実施希望者の公募を広く行い、研究提案について外部専門家から構成される評価会において最も優れた提案を採択する方式により、競争性を担保した。本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。 よって、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	無線局数の増加が見込まれる中、無線システム間の高度な周波数共用などの周波数の稠密利用の検討は喫緊の課題であり、また、我が国の無線産業がグローバル市場への参画を継続するためには、共通的な検証・評価が可能な電波模擬システムを構築し、新たな無線システムの研究開発や技術試験を効率的かつ迅速に実施できるようにする必要がある。特に、今後、Beyond 5G システムの導入に向けて、各国がその主導権を獲得するために様々な技術検証に積極的に取り組むことが予想されるところ、成長戦略フォローアップ（令和元年 6 月 21 日閣議決定）においても、「Beyond 5G の要素技術やその円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境に関する研究開発を推進する」とこととされており、我が国が Beyond 5G システムの開発や国際標準化に乗り遅れないためにも、本研究開発等を実施する必要がある。また、今後普及が予想される自動運転やドローン自律走行等についても、実環境では実施できない大規模・複雑な異種・同種システム間の干渉評価を行えるような技術基盤を早期に構築する必要がある。 よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。

5 政策評価の結果（総合評価）

Beyond 5G での新たな無線システムの導入に当たり、実試験での検討に要する期間や費用の圧縮や、実環境では困難な大規模検証を実施するために、仮想空間上での電波模擬システムを開発し、ITS、ドローン、スマートオフィス、スマート工場、スマートメータのアプリケーションのそれぞれに求められる検証機能（中継経路選定、置局設計、大規模検証など）により評価環境を構築した。電波伝搬検証基盤技術を活用したワイヤレスエミュレーション技術を適用することにより、新たな無線システムの研究開発プロセスの加速化・コスト削減及び、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの導入・普及の加速化を図り、我が国の新産業の創出及び国際競争力強化に対して、本研究開発の寄与は極めて大きい。よって、本研究開発には必要性があったと認められる。

仮想環境において無線システムの評価を行うため、 256×256 の無線リンクに対して独立に電波伝搬モデルを与え、ユーザが定義するシナリオに基づき電波伝搬特性が動的に変化する統合システムとして、SISO であれば最大 256 台、 4×4 MIMO であれば最大 64 台の大規模な同時検証を実現できる評価環境の構築を実現した。また、新しい無線アクセス技術である FD を実現するための機能を開発し、B5G を志向した新規技術のエミュレーションを実現し、周波数の有効利用の一層の向上を目指した新規技術の検証が可能であることを確認した。

無線機の電波発射を高精度に模擬するため、ドローンや車載アンテナなど、実利用を想定したアンテナの電波発射挙動モデルを開発し、半値角+30 %の角度範囲で決定係数 0.8 を達成した。これらの成果により、仮想環境において、実環境に近い条件で自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現した。

電波伝搬検証基盤技術では、Wi-SUN FAN 仮想無線機 10000 台の動作実証を成功裏に行った成果をはじめ、課題イの各エミュレーションシナリオに即した、5G-NR、802.11g/ax、Wi-SUN FAN の仮想無線機が動作できる環境を整備し、周波数の有効利用の一層の向上、大規模な同時検証、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現〔いずれもアウトカム〕のいずれに対しても寄与することができ、成果目標を達成することができた。

電波伝搬検証基盤技術では、大規模仮想環境検証基盤の構築により整備された仮想空間上に、評価対象として想定される電波システム、アプリケーションそれぞれに対するワイヤレスエミュレーションに必要な技術的要件を策定することで、本研究開発の必要性、効率性、有効性、公平性、優先性について示すことができたほか、当該成果については、本研究開発終了後も利活用について検討される場であるユーザフォーラムの継続や、関連する研究開発等への波及効果が認められる。

よって、電波伝搬検証基盤技術にて得られた成果により、本研究開発の目標は達成されたと認めることができる。

<今後の課題及び取組の方向性>

応用開発段階においては、周波数資源有効利用に資する無線エリア拡張、無線干渉回避技術に関する研究開発ならびに社会実装への寄与として、このような技術を適用する電波システムのエミュレーションを可能とするとともに、該当外部無線機との相互接続検証を検討する。併せて、想定電波システムに準ずるエミュレーション項目の組合せ最適化および、詳細物理層エミュレーションの実装を行う。

実用化段階においては、研究開発成果を、Beyond 5G 等の無線システム・サービスの実証環境であるテストベッド環境上に整備し、関連する研究開発のための利活用、公募プロジェクト等における利活用、イベント等における利活用に供する。併せて、当該システム・サービスの普及化のためのフォーラム等の活動と連携し、同様に利活用・実証の事例を拡げる。

事業化段階においては、ワイヤレスエミュレータを一般に公開し、法令等の整備や制度化に向けた施策評価、研究開発、事業者による実無線環境・システム評価等の各用途に適したサービス提供を行う。特に事業者等の一般ユーザに向けたサービスとして、評価環境の 3D モデル及び電波伝搬モデル生成のツールを提供し、それらを活用して無線システム導入環境等での活用が可能なサービスフローの構築を完了する。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和 6 年 6 月 21 日）において、目標の達成

状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・様々な電波システムを、仮想空間上で高精度かつリアルタイムにエミュレーション可能な電波模擬システムを開発したことにより、テストベッドの提供や、Beyond 5G時代の我が国の競争力が高まることが期待できる点で、高く評価できる。
- ・大規模で多岐にわたるこれらの研究開発要素を適切に統合し、具体的な無線システムを想定した特性検証まで効率的に進捗させた点は、高く評価できる。また、当初からユーザフォーラムと緊密な連携が図られており、実サービス提供に向けた取り組みが着実になされている点も心強い。
- ・大規模な実際の無線ネットワークの電波伝搬環境を模擬した汎用性を有するエミュレータはこれまで例がなく、今後、様々な電波利用システムの高度化・周波数有効利用に役立つものと期待される。対外発表の件数も多い。

7 評価に使用した資料等

○成長戦略フォローアップ（令和元年6月21日閣議決定）

<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/fu2019.pdf>

○世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和元年6月14日閣議決定）

<https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20190614/siryoul.pdf>

○デジタル社会の実現に向けた重点計画（令和5年6月9日閣議決定）

https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/basic_page/field_ref_resources/5ecac8cc-50f1-4168-b989-2bcaabffe870/b24ac613/20230609_policies_priority_outline_05.pdf

○電波利用料による研究開発等の評価に関する会合

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>